

DESENVOLVIMENTO DE TRAÇADOR DE CURVA IV PARA ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

1st Douglas de Souza Lasch

Univ. Reg. do Noroeste do Est. do Rio Grande do Sul
UNIJUÍ

Ijuí, Rio Grande do Sul
douglas.lasch@sou.unijui.edu.br

2nd Maurício de Campos

Univ. Reg. do Noroeste do Est. do Rio Grande do Sul
UNIJUÍ

Ijuí, Rio Grande do Sul
campos@unijui.edu.br

3rd Paulo Sérgio Sausen

Univ. Reg. do Noroeste do Est. do Rio Grande do Sul
UNIJUÍ

Ijuí, Rio Grande do Sul
sausen@unijui.edu.br

4th Airam Teresa Zago Romcy Sausen

Univ. Reg. do Noroeste do Est. do Rio Grande do Sul
UNIJUÍ

Ijuí, Rio Grande do Sul
airam@unijui.edu.br

Resumo—Com o aumento da demanda por fontes renováveis de geração de energia, tem ocorrido um grande crescimento global no uso de geradores fotovoltaicos. No Brasil, as legislações de 2012 e revisadas em 2022 têm impulsionado a geração de energia fotovoltaica, resultando em uma grande quantidade de equipamentos fotovoltaicos em operação. Ao longo do tempo de operação, é necessário realizar avaliações e diagnósticos do desempenho e vida útil dos módulos fotovoltaicos. Para isso, os traçadores de curva IV são equipamentos capazes de avaliar as condições de operação por meio da leitura das principais grandezas elétricas de um módulo fotovoltaico. Além disso, por meio das informações de irradiação solar, temperatura de operação e do modelo matemático, é possível estimar os parâmetros elétricos e a curva de geração de um módulo fotovoltaico. Diante desse contexto, a proposta deste trabalho é apresentar os resultados preliminares referente ao desenvolvimento de um traçador de curva IV. A partir dos dados obtidos com esse equipamento, será possível realizar a avaliação da taxa de degradação e estimar a vida útil de módulos fotovoltaicos. Essa pesquisa visa contribuir para a melhoria da avaliação do desempenho dos módulos fotovoltaicos e sua eficiência, permitindo uma melhor compreensão das condições de operação desses equipamentos e uma estimativa mais precisa de sua vida útil.

Palavras Chave – Análise de degradação, Geração fotovoltaica, Matlab, Traçador de curva.

I. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de equipamentos mais eficazes para proteção, monitoramento e também a automação de processos do Sistema Elétrico de Potência (SEP). O termo Smart Grid (SG), referenciado a primeira vez por [1], elencavam as premissas de abordagem para um sistema elétrico inteligente.

Dentre os principais aspectos da SG, está a introdução de fontes de Geração Distribuída (GD). A GD é definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como sendo centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

Um dos principais fatores que contribuíram para o crescimento do uso de GD foi o Protocolo de Kyoto em 1992 [2]. Com a necessidade de redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa, a comunidade internacional iniciou a sucessão do uso de fontes de energia convencionais por fontes de energia renovável. Diante disto, houve o crescimento no uso de GD a partir de fonte eólica e principalmente a energia solar fotovoltaica. No ano de 2011, a capacidade global de geração eólica era de 238 GW, e a capacidade de geração fotovoltaica era 70 GW. Com o passar dos anos, houve o crescimento mais significativo do uso da tecnologia fotovoltaica, e no ano de 2020, a capacidade global de energia solar fotovoltaica superou a capacidade global de geração de fonte eólica, 760 GW e 743 GW, respectivamente [3].

No Brasil, o crescimento do uso de geração distribuída foi impulsionado pela publicação da Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, a qual estabeleceu critérios para o sistema de compensação de créditos de energia elétrica para unidades de micro e mini geração. Diante do crescimento exponencial e da necessidade de revisar a legislação, diante deste cenário, em 2022 foi publicada a lei número 14.300, a qual instituiu o marco legal da micro geração e da mini geração distribuída, revisando os critérios de remuneração por parte das distribuidoras de energia elétrica, dentre outros fatores importantes para o crescimento do setor de geração de energia distribuída [4].

Com isso, diante do aumento do uso de geração distribuída utilizando fonte solar fotovoltaica, há o incremento de módulos fotovoltaicos em operação. Logo, com o passar dos anos haverá o aumento da necessidade de avaliações e diagnósticos dos equipamentos instalados nessas unidades de geração fotovoltaica. Tendo em vista que há um prognóstico de degradação da capacidade de geração nominal dos módulos fotovoltaicos, a avaliação da curva característica dos módulos e a comparação com o modelo matemático podem ser eficazes na determinação da vida útil dos equipamentos em operação. Diante deste cenário, este trabalho apresenta os dados prelimi-

nares do desenvolvimento de um traçador de curva IV que será utilizado em conjunto com o modelo matemático para estimar a taxa de degradação de módulos fotovoltaicos. O traçador de curva irá realizar a extração da curva característica de tensão versus corrente do módulo fotovoltaico em análise. Além disto, irá obter a leitura de irradiação solar e temperatura de operação das células fotovoltaicas no instante da extração da curva IV, para que, com estas duas variáveis possa ser estimada a curva IV do referido módulo. Diante das duas curvas, uma real extraída e uma estimada pelo modelo matemático e sem considerar perdas, possa ser realizada a comparação e estimar a possível degradação do módulo fotovoltaico.

II. DEGRADAÇÃO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A degradação em módulos fotovoltaicos refere-se à perda gradual da capacidade de um módulo fotovoltaico gerar eletricidade ao longo do tempo. Existem vários fatores que podem contribuir para a degradação dos módulos fotovoltaicos, incluindo:

- Degradação intrínseca: relacionada com a própria natureza dos materiais utilizados na construção do módulo solar. O envelhecimento natural do silício, principal componente dos painéis solares, é um exemplo disso.
- Condições climáticas: altas temperaturas, umidade e radiação ultra-violeta (UV) excessiva podem contribuir para a degradação do material fotovoltaico.
- Falhas no projeto e fabricação: problemas no projeto ou na fabricação do módulo solar podem contribuir para a degradação mais rápida do painel solar.
- Instalação inadequada: a instalação inadequada dos módulos fotovoltaicos pode levar à degradação mais rápida, pois podem ocorrer danos mecânicos e elétricos durante o processo.

A degradação dos módulos fotovoltaicos é um problema comum em sistemas de energia solar e pode levar à diminuição da eficiência do sistema e da sua vida útil. Para minimizar a degradação, é importante garantir que os módulos fotovoltaicos sejam instalados adequadamente e que as condições ambientais sejam monitoradas e gerenciadas de maneira eficaz.

Os fabricantes de módulos fotovoltaicos apresentam uma taxa de degradação linear estimando um percentual de rendimento em um determinado tempo de operação. Porém, essa taxa de degradação apresenta inúmeras variáveis que podem afetar essa taxa de degradação. No trabalho de [5] é apresentada uma revisão a cerca de diferentes fontes de incertezas nas taxas de degradação. Foram analisadas três fontes de incertezas: variáveis climáticas, confiabilidade dos módulos fotovoltaicos e modelos de taxa de degradação. Segundo [5], as maiores incertezas na taxa de degradação são relacionadas a estimativa de temperatura do módulo.

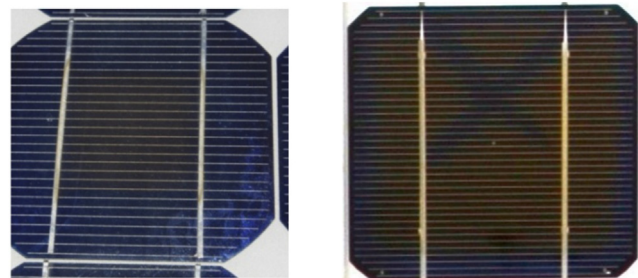
Diante da diversidade de condições e variações as quais os módulos fotovoltaicos são impostas, como por exemplo, a variação de temperatura ambiente dependendo do local de instalação no globo terrestre, há uma dificuldade de prever uma taxa de degradação exata para os equipamentos. Desta forma, os fabricantes apresentam uma estimativa de capacidade de

geração de acordo com o tempo de garantia que é fornecido ao equipamento.

No trabalho de [6], são levantados diversos fatores ambientais que afetam diretamente a degradação do desempenho de módulos fotovoltaicos, e são apresentados mapas com distribuições geográficas, e níveis de risco associados a diferentes parâmetros como a sujeira, variação de temperatura, irradiação UV, dentre outros.

Em [7] é apresentada uma revisão sobre a relação entre a degradação de componentes poliméricos em módulos fotovoltaicos de silício cristalino e condições climáticas. Neste trabalho são apresentados exemplos de degradação decorrentes da exposição das células ao oxigênio. A Fig. 1 apresenta os efeitos de foto-branqueamento devido a permeação de oxigênio através de trincas.

Figura 1. Efeitos de foto-branqueamento



Fonte: [7].

Portando, a degradação da capacidade de geração dos módulos fotovoltaicos depende de inúmeros fatores associados a questões construtivas e ambientais as quais o equipamento está exposto. Logo, há uma dificuldade em apresentar modelos de degradação que representem fielmente o processo de degradação. A comunidade científica tem trabalhado em modelos matemáticos de regressão para estimar taxas de degradação de forma a auxiliar a determinação da vida útil de módulos fotovoltaicos, porém, tratam-se de sistemas complexos e que dependem de um grande banco dados com informações de todas as variáveis climáticas e físicas associadas ao processo de degradação, e também dependem de um tempo de coleta de dados considerável para possibilitar uma melhor análise dos resultados.

III. TRAÇADOR DE CURVA IV

O traçador de curva IV (Corrente-Tensão) é uma ferramenta importante para a análise de desempenho de módulos fotovoltaicos, pois permite obter informações sobre as características elétricas do módulo em diferentes condições de operação.

A curva IV é uma representação gráfica da relação entre a corrente e a tensão do módulo fotovoltaico, e é utilizada para determinar parâmetros importantes, como a corrente de curto-circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a corrente máxima de potência (I_{mp}), a tensão máxima de potência (V_{mp}) e a eficiência do módulo.

Com o traçador de curva IV, é possível medir esses parâmetros em diferentes condições de irradiação e tempe-

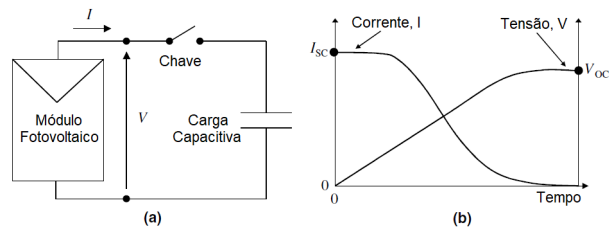
ratura, o que permite avaliar o desempenho do módulo em condições reais de operação e compará-lo com o desempenho especificado pelo fabricante.

Como os traçadores de curva IV disponíveis comercialmente são equipamentos com um alto custo para aquisição, optou-se pelo desenvolvimento de um traçador de curva IV. Um ponto importante para o desenvolvimento de um traçador de curva IV é a definição de qual tipo de carga utilizar para realizar a circulação da corrente e dissipação da potência elétrica. O trabalho de [8], apresentou uma revisão abrangente sobre algumas das topologias mais utilizadas, sendo elas:

- Método de carga resistiva variável;
- Método de carga capacitiva;
- Método de carga eletrônica;
- Método de fonte de alimentação de quatro quadrantes;
- Método do conversor corrente contínua DC-DC.

Analisando as topologias possíveis de utilização no desenvolvimento do traçador de curva IV, optou-se pela utilização do método de carga capacitiva. Nesta topologia, são utilizados capacitores com nível de tensão de isolamento compatíveis com o nível de tensão dos módulos que serão analisados. O valor da capacitância da carga define o tempo da curva de carga juntamente com as características elétricas dos módulos fotovoltaicos, com isso é preciso que o sistema de aquisição das grandezas elétricas tenha uma taxa de amostragem suficiente para obter os valores de tensão e corrente dentro do tempo da curva de carregamento. A Fig. 2 apresenta a característica do comportamento de corrente e tensão quando ligada uma carga capacitiva a um módulo fotovoltaico.

Figura 2. (a) Carga capacitiva ideal composta por uma chave e um capacitor. (b) Formas de onda de corrente e tensão após fechar a chave em $t = 0$

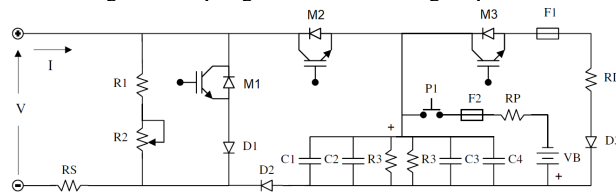


Fonte: Adaptado de [9].

Nesta topologia com carga capacitiva podem ser utilizados MOSFETS para realizar as manobras de abertura e fechamento do circuito eletrônico. Alguns estudos desenvolveram traçadores de curva com carga capacitiva. Os trabalhos de [10] e [9] utilizaram carga capacitiva e com topologia de chaveamento similares a topologia apresentada pela Fig. 3.

Nesta topologia da Fig. 3, o primeiro MOSFET (M1) tem a função de realizar o fechamento do circuito para leitura da corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico (I_{sc}). O segundo MOSFET (M2), realiza o fechamento do circuito para o carregamento dos capacitores e leitura da corrente e tensão sobre a carga capacitiva. Por fim, o terceiro MOSFET (M3) realiza a descarga dos capacitores deixando-os preparados para um novo ensaio.

Figura 3. Topologia do circuito de carga capacitiva



Fonte: Adaptado de [9].

A partir destes dados coletados no ensaio com o traçador de curva IV, é possível obter a curva característica de operação do módulo fotovoltaico sob as condições de irradiação e temperatura no momento do teste. Esses dados são utilizados para avaliar o desempenho do módulo e compará-lo com o desempenho especificado pelo fabricante. Além disso, o traçador de curva IV também pode ser usado para identificar possíveis defeitos ou problemas de desempenho no módulo fotovoltaico, como pontos quentes, falhas de solda ou problemas de contato elétrico.

Portanto, o traçador de curva IV é uma ferramenta fundamental para a análise de desempenho e diagnóstico de problemas em módulos fotovoltaicos, ajudando a garantir a eficiência e confiabilidade desses sistemas de geração de energia.

IV. PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

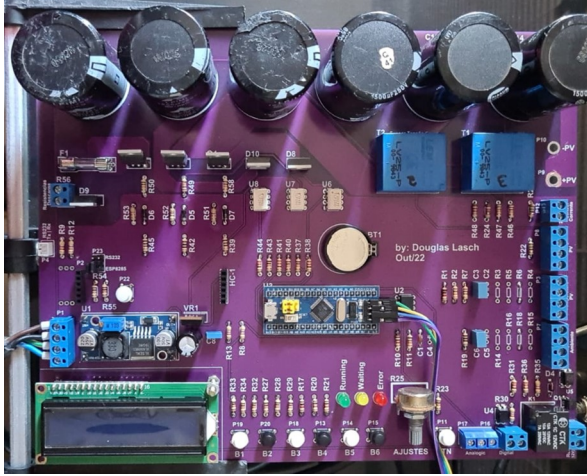
Como etapa de testes iniciais para o desenvolvimento do traçador de curva, foi elaborado um projeto eletrônico de um traçador de curva IV com carga capacitiva. Para facilitar a elaboração do projeto eletrônico, foram definidos os limites de 20 A e 100 V para corrente e tensão respectivamente.

Foram utilizados sensores de tensão de efeito hall para isolar os circuitos de carga e de controle do protótipo, além de um sensor de corrente do tipo janela cujo princípio de funcionamento também é por meio do efeito hall. Para a unidade de processamento do protótipo foi utilizado um microcontrolador ARM, cortex M3 com frequência de clock de até 72 MHz, o que possibilitou uma taxa de amostragem de leituras de corrente e tensão suficiente para reprodução da curva. A Fig. 4 apresenta o resultado final da montagem do protótipo usado para os testes iniciais do projeto.

A carga capacitiva foi composta por seis capacitores de 1.500 μF ligados em paralelo, totalizando uma carga de 9.000 μF . Com esta carga, com uma taxa de amostragem de 100 μs , durante o tempo de carregamento de aproximadamente 150 ms, foi possível realizar 1500 leituras de corrente e tensão para a composição da curva corrente versus tensão. A Fig. 5 apresenta a curva corrente versus tensão extraída de um módulo fotovoltaico da Canadian Solar modelo CS6W-550MS.

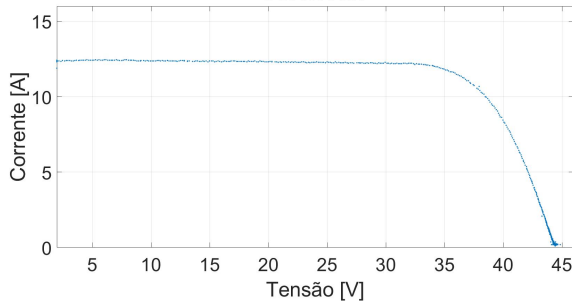
O protótipo além de realizar a leitura de corrente e tensão do módulo fotovoltaico, realiza também a aquisição da temperatura de operação através de um sensor de temperatura alocado junto às células durante o ensaio. Além disto, foi projetado o uso de um piranômetro para a leitura da irradiação solar. A próxima etapa do projeto é a calibração da leitura de

Figura 4. Placa eletrônica do protótipo



Fonte: Do Autor.

Figura 5. Curva IV obtida pelo protótipo
CURVA IxV



Fonte: Do Autor.

temperatura de operação e da irradiação solar, pois com estes valores será possível estimar a curva corrente versus tensão para o módulo no instante do ensaio utilizando a modelagem matemática.

V. MODELO MATEMÁTICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Para estimar a curva de corrente versus tensão do módulo fotovoltaico sob análise, será utilizado o software MATLAB®. A partir dos dados de irradiação solar e temperatura de operação obtidos pelo traçador de curva, o algoritmo elaborado irá estimar através do modelo matemático qual é a potência nominal do módulo. A partir da curva estimada pelo modelo matemático, e a curva de operação extraída pelo traçador, será possível realizar a análise de degradação do referido módulo fotovoltaico.

A Fig. 6 apresenta o circuito equivalente utilizado na modelagem matemática. Este circuito é denominado modelo de um diodo.

Aplicando a Lei dos Nós de Kirchhoff no circuito equivalente apresentado na Fig. 6, obtemos a expressão que corresponde a corrente de saída da célula:

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

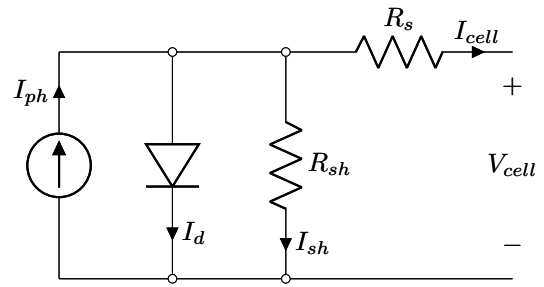


Figura 6. Circuito equivalente da célula fotovoltaica (modelo de um diodo).

A fotocorrente $I_{ph}[A]$ depende diretamente do nível de irradiação solar $G_a[W/m^2]$, e também da temperatura ambiente $T_a[^\circ K]$, e pode ser expressa por Eq. 2. A proporcionalidade da fotocorrente com a irradiação é apresentada na equação Eq. 3.

$$I_{ph} = I_0 + K_0(T_c - T_{ref}) \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{G_a I_{sc}}{G_{ref}} \quad (3)$$

Na Eq. 3, G_{ref} tem valor definido de $1000[W/m^2]$ e corresponde à referência da irradiação solar e I_{sc} é a corrente de curto circuito obtida no catálogo dos fabricantes. Já na Eq. 2 T_{ref} é a referência de temperatura ambiente, K_0 corresponde ao coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito e T_c é a temperatura de operação da célula.

$$T_c = T_a + G_a \frac{NOCT - 20^\circ C}{800 W/m^2} \quad (4)$$

A temperatura real de operação da célula é corrigida pela Eq. 4 e leva em conta a temperatura ambiente T_a , a irradiação solar incidente na célula G_a , além do parâmetro NOCT (*Normal Operating Cell Temperature*) que é fornecido pelo fabricante do painel e varia geralmente entre $45^\circ C$ e $49^\circ C$. NOCT é definido como a temperatura da célula quando a temperatura ambiente for $20^\circ C$, a irradiação solar for de $0,8 kW/m^2$ e a velocidade do vento for igual a $1 m/s$.

A corrente no diodo é definida na Eq. 5:

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q}{n.k.T_c} (V_{cel} + R_s I_{cel}) \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Sendo:

$$I_{sat} = I_{or} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left[-\frac{q.E_g}{n.k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (6)$$

E:

$$I_{or} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp \left(\frac{q.V_{oc}}{n.k.T_{ref}} \right) - 1 \right]} \quad (7)$$

Onde:

- I_{sat} – corrente de saturação do diodo [A];
- q – carga do elétron: $1,6 \times 10^{(-19)} [C]$;
- n – fator de idealização: 1,525;
- k – constante de Boltzmann: $1,38 \times 10^{(-23)} [J/K]$;
- V_{cel} – tensão da célula [V];
- R_s – resistência série Ω ;
- I_{or} – corrente de saturação do diodo em $T_r [A]$;
- E_g – gap energy: $1,11 [eV]$; e
- V_{oc} – tensão de circuito aberto por célula [V].

A corrente paralelo $I_{sh} [A]$ é definida por:

$$I_{sh} = \frac{V_{cel} + R_s I_{cel}}{R_{sh}} \quad (8)$$

A contribuição da corrente de curto circuito no modelo matemático apresenta um valor muito baixo de variação, desta forma a contribuição desta corrente foi desprezada no modelo. A resistência série pode ser calculada por:

$$R_s = -\frac{\delta V_{cel}}{\delta I_{voc}} - \frac{1}{X_{vcel}} \quad (9)$$

Em que:

$$X_{vcel} = \frac{I_o \cdot q}{n \cdot k \cdot T_{ref}} \exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot k \cdot T_{ref}}\right) \quad (10)$$

Mais detalhes sobre o modelo matemático são encontrados na bibliografia. [11].

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os primeiros ensaios em módulos fotovoltaicos utilizando o protótipo do traçador de curva IV apresentaram um desempenho satisfatório. Os resultados preliminares buscaram obter uma taxa de amostragem de valores de corrente e tensão que fossem capazes de caracterizar a curva do módulo sob ensaio. Dentro dos limites estabelecidos de tensão e corrente para o protótipo, a taxa de amostragem foi capaz de caracterizar a curva com 1500 leituras.

Antes da possibilidade de avaliar a degradação do módulo fotovoltaico, o projeto precisa passar por duas fases importantes que são: a calibração dos sensores de temperatura e irradiação solar, e por fim, a conclusão do processo de estimativa da curva IV através da modelagem matemática. Como a curva estimada pelo modelo matemático não considera as perdas, ou seja, são estimativas para o desempenho de um módulo fotovoltaico novo, esta curva será utilizada como base de comparação com a curva extraída para que seja estimada a degradação do módulo fotovoltaico em análise.

Logo, com a análise de degradação dos equipamentos, estudo proposto também poderá ajudar a aprimorar o processo de manutenção dos módulos fotovoltaicos, reduzindo os custos operacionais e aumentando a eficiência do sistema como um todo. Por fim, a pesquisa tem o potencial de contribuir para o desenvolvimento da energia fotovoltaica no Brasil e no mundo, promovendo a transição para uma matriz energética mais sustentável e renovável.

REFERÊNCIAS

- [1] Amin, M. & Wollenberg, B. Toward a Smart Grid. *IEEE Power E Energy Magazine.*, 34-41 (2005)
- [2] Miyamoto, M. & Takeuchi, K. Climate agreement and technology diffusion: Impact of the Kyoto Protocol on international patent applications for renewable energy technologies. *Energy Policy.* **129**, 1331-1338 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.053>
- [3] Shafullah, M. & Ahmed, S. Grid Integration Challenges and Solution Strategies for Solar PV Systems : A Review. *IEEE Access.* **10** pp. 52233-52257 (2022)
- [4] Notícias, A. Lei institui marco legal da micro e minigeração de energia. (Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/843782-LEI-INSTITUI-MARCO-LEGAL-DA-MICRO-E-MINIGERACAO-DE-ENERGIA>. Acesso em: 01 abril 2023,2022)
- [5] Kaaya, I., Ascencio-Vásquez, J., Weiss, K. & Topič, M. Assessment of uncertainties and variations in PV modules degradation rates and lifetime predictions using physical models. *Solar Energy.* **218** pp. 354-367 (2021), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21000979>
- [6] Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J., Skoczek, A., Suri, M. & Cebecauer, T. Geographical Distribution of Factors Accelerating Performance Degradation of PV Modules. *2018 IEEE 7th World Conference On Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference Of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*. pp. 1301-1304 (2018)
- [7] Omazic, A., Oreski, G., Halwachs, M., Eder, G., Hirschl, C., Neumaier, L., Pinter, G. & Erceg, M. Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review. *Solar Energy Materials And Solar Cells.* **192** pp. 123-133 (2019), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024818305956>
- [8] Zhu, Y. & Xiao, W. A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer. *Solar Energy.* **196** pp. 346-357 (2020), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19312344>
- [9] Muñoz, J. & Lorenzo, E. Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. *Solar Energy.* **80**, 1489-1497 (2006), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X06000065>, European Solar Conference (EuroSun 2004)
- [10] Chen, Z., Lin, W., Wu, L., Long, C., Lin, P. & Cheng, S. A capacitor based fast I-V characteristics tester for photovoltaic arrays. *Energy Procedia.* **145** pp. 381-387 (2018), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218300341>, Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid
- [11] G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model", in *Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia*, 21(1):49-55, 2001.